镉胁迫显著影响甜菜夜蛾成虫的飞行能力

邹金城，孙　宇，杨　勇，杨益众，张子昕，王思雨，苏宏华*

（扬州大学园艺与植物保护学院，江苏扬州 225009）

摘要：【目的】重金属污染是目前全球面临的重要环境问题。本研究旨在评价镉污染对迁飞性昆虫甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 飞行能力的影响。【方法】利用昆虫飞行信息采集系统对不同浓度镉胁迫下(0, 0.20, 0.80, 3.20 和 12.80 mg/kg)不同日龄(1, 3, 5 和 7 日龄)和不同性别甜菜夜蛾成虫飞行能力进行了研究。【结果】不同浓度镉胁迫对不同日龄和不同性别甜菜夜蛾成虫飞行能力的影响存在显著差异。以 0.20 mg/kg 处理下 3 日龄雌成虫飞行能力最强,平均飞行距离最远,为 36.96 km。在所测日龄中,0.20 mg/kg 的低浓度镉处理与对照相比飞行能力差异不显著;随着镉浓度的升高,雌雄成虫飞行能力均显著下降;重金属镉胁迫对雄虫飞行能力的抑制作用比对雌虫更加明显。【结论】镉胁迫对不同日龄和不同性别甜菜夜蛾成虫飞行能力具有显著影响。

关键词：甜菜夜蛾；重金属污染；镉；日龄；性别；飞行能力

中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2017)09-1021-10

Cadmium stress significantly affects the flight performance of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) adults

ZOU Jin-Cheng, SUN Yu, YANG Yong, YANG Yi-Zhong, ZHANG Zi-Xin, WANG Si-Yu, SU Hong-Hua* (School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: 【Aim】Heavy metal pollution has become one of important environmental issues globally. This study aims to evaluate the effects of cadmium exposure on the flight performance of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*, a migratory insect. 【Methods】Insect flight information system was used to study the flight performance of female and male adults of *S. exigua* at different ages (1, 3, 5 and 7 day-old), which were fed with the artificial diets containing different concentrations of cadmium (0, 0.20, 0.80, 3.20 and 12.80 mg/kg), respectively. 【Results】There were significant differences in the flight performance of *S. exigua* adults exposed to different concentrations of cadmium. The 3 day-old female adults stressed by low concentration of cadmium (0.20 mg/kg) were the best fliers with the longest average flight distance (36.96 km). The flight performance of *S. exigua* adults exposed to 0.20 mg/kg cadmium was not significantly different from that of the control. With the increase of cadmium concentration, the flight performance of both male and female adults decreased significantly. The negative effects of heavy metal cadmium stress on the performance of male adults were more obvious than on that of female adults. 【Conclusion】Different concentrations of cadmium stress have significant effects on the flight performance of *S. exigua* adults of different ages and different sexes.

Key words: *Spodoptera exigua*; heavy metal pollution; cadmium; age; sex; flight performance

---

基金项目：江苏省重点研发计划(现代农业)子项目蔬菜病虫害农药减量增效防控技术研究(BE2017379-3)；转基因重大专项抗虫玉米节肢动物的种群监控技术(2016ZX08012004-010)；上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字-2014-7-3-2 号)

作者简介：邹金城，男，1990 年 12 月生，江苏灌云人，硕士研究生，研究方向为昆虫生态学，E-mail：964339810@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: susugj@126.com

收稿日期 Received: 2017-05-19；接受日期 Accepted: 2017-08-09

重金属污染已经成为全球关注的重要的环境问题之一。随着科学技术的进步和农业现代化进程的不断加快,各种化学品、农药以及化肥的大量使用,使得重金属污染的总体形势越来越严峻。据统计,我国农田土壤重金属污染面积约2 500万 m^2,污染面积占总耕地面积的 1/6 左右,每年被重金属污染的粮食多达1 200万 t,进而导致粮食减产高达1 000多万 t,合计经济损失 200 多亿元(Zhang *et al*., 2015)。其中,镉(Cd)污染最为严重,全国约有 1/4 的耕地受到了镉污染,此外也受到不同程度的 Hg, Pb, Ni, As 和 Cr 污染(宋伟等, 2013)。重金属具有转移特性,会从大气、土壤、水体等中沿着食物链进行转移,从而在植物、动物和人类体内进行富集,对生物有机体产生严重影响(Alturiqi and Albedair, 2012; Abdolgader *et al*., 2013)。

镉对蔬菜可食用部分的污染情况也不容乐观。研究表明,上海市郊蔬菜可食用部分镉的平均含量为 0.243 mg/kg,对比国家食品安全标准(GB2762-2005),超标率为 54.07%(张焕焕, 2015)。昆虫取食受重金属污染的寄主植物后,重金属对昆虫个体和种群的影响程度与寄主植物中的重金属浓度密切相关。适当浓度的重金属胁迫可以导致幼虫、蛹、成虫的存活率提高、单雌产卵量增加、种群内禀增长率提高等,从而刺激昆虫种群增殖(孙虹霞等, 2007, 2008; 胡蒙蒙等, 2014; 曹红妹等, 2015);高浓度的重金属处理或者低浓度的重金属连续世代的处理会导致昆虫存活率降低、单雌产卵量减少、种群净增殖率下降,从而抑制种群的增长(孙虹霞等, 2007, 2010; Kafel *et al*., 2012, 2014; 胡蒙蒙, 2013)。重金属还会对昆虫的行为造成影响,如随着重金属 Ni^{2+} 浓度的增高,亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 雌成虫的求偶行为逐渐受到抑制;低浓度的金属 Ni^{2+} 对雄成虫的定向行为有促进作用,但随着 Ni^{2+} 浓度的进一步升高,抑制作用则越来越明显(曹红妹等, 2015);重金属镉和锌对麦长管蚜 *Sitobion avenae* 的唾液分泌、取食刺探等取食行为也有显著的影响(武晶晶等, 2012)。此外,研究发现同种重金属在同种昆虫的雌雄体内富集的程度存在显著差异, 如雌性蝗虫比雄性蝗虫富集镉的能力强(Devkota and Schmidt, 2000)。

甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 属鳞翅目(Lepidoptera)夜蛾科(Noctuidae),是一种世界性分布的多食性害虫。寄主范围广,涉及 35 科 108 属 138 种植物,尤其以蔬菜为害最为严重(张彬等, 2008; Su *et al*., 2014)。自 20 世纪 80 年代中期开始,甜菜夜蛾在我国逐渐由次要害虫上升为主要害虫,暴发频率明显增加,面积逐年扩大,多次造成灾害性为害,导致巨大的经济损失(文礼章和张友军, 2010)。甜菜夜蛾是一种远距离迁飞性害虫,室外能飞行 96 h, 飞行距离可达 3 500 km (Mikkola and Salmensuu, 1965);实验室内可以累计飞行 179 km,累计最长飞行时间 50 h(江幸福等, 1998)。众所周知,长距离迁飞行为增加了害虫预防预测和防控的难度,成虫的飞行能力一定程度上可以决定害虫所危害的区域和面积。然而,很少有研究关注农田重金属对迁飞性害虫成虫飞行性能的影响。重金属镉位于全球重金属污染之首,但目前关于镉对甜菜夜蛾飞行行为的影响未见研究报道。因此,本研究通过测定不同浓度镉胁迫下的甜菜夜蛾成虫飞行参数,以期明确农田常见重金属镉对甜菜夜蛾飞行能力的影响,从而为解析甜菜夜蛾的种群结构和暴发机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及饲养方法

甜菜夜蛾由中国农业科学院植物保护研究所提供,在室内用人工饲料饲养 10 代后,选择发育正常的虫源作为试验材料。幼虫期,将孵化不超过 12 h 的幼虫放有人工饲料的养虫盒中饲养,待幼虫生长至 3 龄后再接到 24 孔板中单头饲养,饲养温度为 26 ± 2℃,光周期为 14L:10D,相对湿度 60% ~80%。化蛹后,将雌雄蛹置于一次性塑料杯中以添加不同浓度镉或不添加镉的人工饲料进行单头饲养,选择羽化完全的成虫用于飞行能力测试。

1.2 仪器

用于成虫飞行能力测试的昆虫飞行信息采集系统(FXM-Z)购于河南佳多科工贸有限责任公司。

1.3 重金属镉(Cd^{2+})浓度及不同处理设定

试验所用氯化镉由国药集团化学试剂有限公司提供。添加氯化镉后按照人工饲料的重量换算成镉离子浓度,分别为 0.20, 0.80, 3.20 和 12.80 mg/kg,以此作为不同浓度镉处理,以不添加镉的人工饲料作为对照,共计 5 个处理。

1.4 飞行距离、飞行时间和飞行速度的测定

成虫羽化后,不进行补充营养,分别选取羽化 1, 3, 5 和 7 日龄健康的甜菜夜蛾雌雄成虫各 30 头左右,在昆虫飞行信息采集系统上进行测试。成虫

在飞行磨上吊飞的测试方法参考 Jiang 等(2010)并稍作改进。测试开始前先用乙酸乙酯(国药集团化学试剂有限公司)将成虫轻度麻醉,然后用毛笔将成虫背面胸腹部连接处的毛轻轻刷去,再用 502 胶(瑞昌同声胶业有限公司)粘接于吊环上,将吊环悬挂于飞行磨的吊臂上进行测试。吊飞测试开始时间均为每晚 19:00,每日测试时长为 24 h。测试在温度 26 ±2℃,相对湿度 60% ~80%,全黑暗条件下进行。

1.5　数据统计与分析

根据飞行信息采集系统自动记录的成虫单次最长飞行距离、最长飞行时间和最大飞行速度以及飞行总距离、飞行总时间和平均飞行速度,进行数据统计分析;不同浓度镉处理下同一日龄雌雄成虫间和同一浓度镉处理不同日龄成虫间各参数的比较分别采用 DPS 7.05 中的单因素方差分析及邓肯氏新复极差法进行多重比较,同一镉浓度处理同一日龄雌雄成虫间各参数的比较采用 t 测验。数据表示为平均数 ± 标准误。

2　结果

2.1　镉胁迫对甜菜夜蛾成虫单次最长飞行距离、最长飞行时间和最大飞行速度的影响

2.1.1　对单次最长飞行距离的影响:不同浓度镉胁迫对雌、雄成虫单次最长飞行距离的影响如表 1 所示,0.20 mg/kg 镉处理下仅有 7 日龄雌、雄成虫单次最长飞行距离显著高于对照和 12.80 mg/kg 镉处理($P<0.05$),12.80 mg/kg 镉处理下仅有 1 日龄雄成虫单次最长飞行距离显著高于对照,其余日龄成虫的单次最长飞行距离在不同浓度镉处理间差异均不显著。0.20, 0.80 和 3.20 mg/kg 镉处理下雌成虫单次最长飞行距离极显著高于雄成虫,7 日龄雌、雄成虫以 0.20 mg/kg 镉处理下单次最长飞行距离最远,且雄成虫的单次最长飞行距离极显著高于雌成虫($P<0.01$)。

2.1.2　对单次最长飞行时间的影响:对各镉浓度处理下雌雄成虫的单次最长飞行时间进行分析,如表 2。仅有 12.80 mg/kg 镉处理下的 5 日龄雄成虫单次最长飞行时间与其他浓度处理相比具有显著差异($P<0.05$),其余日龄成虫的单次最长飞行时间在不同浓度镉处理之间均没有显著差异;0.20 mg/kg 镉处理下的 1 日龄雌成虫单次最长飞行时间显著高于雄成虫,且 3 日龄雌成虫单次最长飞行距离极显著高于雄成虫。

2.1.3　对最大飞行速度的影响:0.20 mg/kg 下的雌成虫最大飞行速度高于对照,但与其他浓度镉处理相比并没有显著差异(表 3),虽然 12.80 mg/kg 镉胁迫下的雌成虫在 4 个日龄中均保持着最快的最大飞行速度,但与其他浓度镉处理相比,仅有 1 日龄雌成虫的最大飞行速度与对照相比达到显著差异水平。

2.2　镉胁迫对不同日龄和不同性别甜菜夜蛾成虫平均飞行距离、飞行时间和飞行速度的影响

2.2.1　对平均飞行距离的影响:从表 4 中可以看出,同一浓度镉处理下不同日龄雌雄成虫间平均飞行距离存在显著差异($P<0.05$),以 3 日龄成虫飞行能力最强,平均飞行距离最远,而 5 和 7 日龄成虫平均飞行距离均显著低于 1 日龄成虫($P<0.05$)。不同浓度镉处理下同一日龄雌雄虫间平均飞行距离也均存在显著差异($P<0.05$),除 0.20 mg/kg 处理下 1 日龄雄成虫平均飞行距离低于对照外,其余所有日龄中,雌、雄成虫均以 0.20 mg/kg 处理下平均飞行距离最远,但与对照相比差异不显著($P>0.05$);而高浓度镉处理(3.20 和 12.80 mg/kg)下平均飞行距离要显著低于低浓度镉处理(0.20 和 0.80 mg/kg)和对照。此外,除羽化后 1 日龄对照雌雄成虫之外,其他日龄雌成虫平均飞行距离均高于同日龄雄成虫。

2.2.2　对平均飞行时间的影响:从表 5 中可以看出,除 3.20 mg/kg 镉处理下 1 日龄与 5 日龄雌雄成虫间平均飞行时间差异不显著($P>0.05$)外,其他浓度镉处理下不同日龄雌雄成虫间平均飞行时间均存在显著差异($P<0.05$),以 3 日龄成虫平均飞行时间最长,而 5 和 7 日龄成虫平均飞行时间要显著低于 1 日龄成虫;除 0.20 mg/kg 镉处理下 1 日龄雄成虫平均飞行时间低于对照外,均以 0.20 mg/kg 镉处理下雌雄成虫平均飞行时间最长,其中除 3 日龄成虫外,1 日龄雌雄虫、5 和 7 日龄雌虫与对照组之间差异不显著($P>0.05$);同一浓度镉处理下同一日龄雌雄成虫之间平均飞行时间也存在显著差异($P<0.05$),除 1 日龄对照以及低浓度镉处理下的 5 日龄成虫外,其他浓度镉处理下雌成虫平均飞行时间均大于雄成虫。

2.2.3　对平均飞行速度的影响:从表 6 中可以看出,在所有浓度镉处理中,1 和 3 日龄雌雄成虫间平均飞行速度均未达到显著性差异($P>0.05$),5 和 7 日龄成虫与 1 和 3 日龄成虫相比平均飞行速度显著

表 1 镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫单次最长飞行距离的影响

Table 1 Effects of cadmium on the longest single flight distance of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	单次最长飞行距离 Longest single flight distance (km)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	5.80 ± 5.04 Aa	1.51 ± 1.52 Ba	12.59 ± 9.00 Aa	7.78 ± 7.12 Aa	5.67 ± 8.48 Aa	1.19 ± 1.16 Aa	0.14 ± 0.04 Bb	0.34 ± 0.22 Ba
0.20	12.99 ± 6.86 Aa*	2.36 ± 2.39 ABa	15.11 ± 6.18 Aa**	1.82 ± 1.61 Aa	7.79 ± 7.59 Aa	2.58 ± 0.12 Aa	0.21 ± 0.01 Aa	1.21 ± 0.11 Aa**
0.80	7.51 ± 8.90 Aab	3.11 ± 2.47 ABa	16.47 ± 4.23 Aa**	3.67 ± 2.48 Aa	5.06 ± 6.21 Ab	1.80 ± 1.60 Aab	0.12 ± 0.04 Bb	0.19 ± 0.14 Bb
3.20	7.14 ± 4.82 Aa	4.70 ± 5.03 ABa	8.17 ± 1.01 Aa**	3.02 ± 0.82 Aa	5.89 ± 5.71 Aab	2.35 ± 1.02 Aa	0.12 ± 0.11 ABb	0.25 ± 0.18 Ba
12.80	7.71 ± 1.31 Aa	7.35 ± 3.84 Aa	7.53 ± 2.63 Aa	3.24 ± 3.61 Aab	3.55 ± 0.13 Ab*	1.02 ± 0.01 Abc	0.06 ± 0.04 Bc	0.13 ± 0.02 Bc*

表中所列数据为平均数 ± 标准误。不同数据后标大写字母表示同一日龄不同浓度镉处理间差异显著($P<0.05$)(单因素方差分析)，不同数据后标小写字母表示同一浓度镉处理下不同日龄间差异显著($P<0.05$)(邓肯氏新复极差法)，数据后单星号和双星号分别表示同一浓度镉处理下同一日龄雌雄成虫之间差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$)(t 检验)。下表同。The data in the table are presented as mean ± *SE*. Different capital letters behind the data mean significant difference among different treatments at the same age ($P<0.05$) (One-way ANOVA), while different small letters mean significant difference among different ages at the same treatment ($P<0.05$) (Duncan's multiple range test). The single asterisk and double asterisk following the data mean significant difference ($P<0.05$) and extremely significant difference ($P<0.01$) (t test) between male and female adults, respectively. The same for the follwing tables.

表 2 镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫单次最长飞行时间的影响

Table 2 Effects of cadmium on the longest single flight duration of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	单次最长飞行时间 Longest single flight duration (h)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	2.00 ± 1.47 Aa	0.68 ± 0.95 Aa	3.24 ± 2.41 Aa	2.49 ± 2.34 Aa	1.32 ± 1.93 Aa	1.42 ± 0.17 Aa	0.07 ± 0.01 Ab	0.16 ± 0.11 Aa
0.20	3.56 ± 1.58 Aab*	0.85 ± 0.89 Aab	4.12 ± 1.18 Aa**	1.27 ± 0.46 Aa	2.58 ± 2.47 Aab	1.30 ± 0.04 Aa	0.07 ± 0.11 Ab	0.19 ± 0.08 Ab
0.80	1.66 ± 2.06 Aa	1.63 ± 0.87 Aa	5.63 ± 5.35 Aa	1.35 ± 0.88 Aa	1.24 ± 0.01 Aa	1.38 ± 0.12 Aa	0.05 ± 0.01 Aa	0.13 ± 0.38 Aa
3.20	1.18 ± 1.08 Aa	1.56 ± 1.46 Aa	2.39 ± 0.41 Aa*	1.35 ± 0.34 Aa	1.67 ± 1.77 Aa	1.69 ± 1.20 Aa	0.04 ± 0.01 Aa	0.12 ± 0.13 Aa
12.80	1.40 ± 0.56 Aa	1.70 ± 0.42 Aa	1.45 ± 0.74 Aa	1.83 ± 0.91 Aa	0.91 ± 0.05 Aa*	0.38 ± 0.09 Bb	0.03 ± 0.02 Ab	0.12 ± 0.14 Ac

表 3　镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫最大飞行速度的影响

Table 3　Effects of cadmium on the maximum flight velocity of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	最大飞行速度 Maximum flight velocity (km/h)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	5.75 ±1.66 Bab	6.41 ±2.05 Aa	8.27 ±1.51 Aa	8.98 ±5.03 Aa	6.70 ±1.70 Aab	10.30 ±6.22 Aa	5.35 ±1.00 Ab	6.77 ±3.57 ABa
0.20	8.34 ±1.49 ABa	8.27 ±2.59 Aa	8.59 ±0.50 Aa	6.37 ±2.26 Aa	7.57 ±0.85 Aa	8.03 ±2.26 Aa	6.73 ±3.53 Aa	7.47 ±1.00 Aa
0.80	7.90 ±1.74 ABa	6.88 ±2.12 Aa	7.30 ±2.86 Aab	6.94 ±2.11 Aa	7.95 ±1.76 Aa	7.79 ±0.74 Aa	5.36 ±1.23 Ab	6.77 ±2.33 Aa
3.20	8.18 ±2.50 ABa	8.36 ±1.92 Aa	7.26 ±1.43 Aa	7.04 ±2.56 Aa	6.72 ±1.20 Aa	9.82 ±4.49 Aa	4.43 ±4.49 Aa	3.61 ±1.12 Bb
12.80	8.40 ±2.27 Aa	8.86 ±3.86 Aa	9.80 ±3.01 Aa	6.68 ±2.89 Aab	10.12 ±6.32 Aa	8.38 ±2.38Aa	7.69 ±2.14 Aa	5.55 ±1.39 ABb

表 4　镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫平均飞行距离的影响

Table 4　Effects of cadmium on the average flight distance of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	平均飞行距离 Average flight distance (km)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	22.70 ±1.76 ABb	22.88 ±1.17 Ab	32.56 ±2.34 Aa	28.95 ±1.34 Ba	15.21 ±0.68 Ac	14.94 ±0.47 Ac	6.12 ±0.46 ABd **	2.63 ±0.07 Bd
0.20	24.89 ±2.12 Ab	22.26 ±1.56 ABb	36.96 ±3.09 Aa	33.44 ±1.15 Aa	16.21 ±0.91 Ac	15.57 ±0.46 Ac	6.40 ±0.54 Ad *	5.21 ±0.21 Ad
0.80	22.27 ±1.15 ABb	19.90 ±0.74 Bb	31.74 ±3.51 Aa	26.50 ±0.85 Ba	15.03 ±0.41 Ac	14.77 ±0.46 Ac	5.53 ±0.23 ABd **	2.77 ±0.21 Bd
3.20	18.68 ±1.34 BCb *	15.55 ±0.52 Cb	25.12 ±1.12 Ba **	20.25 ±0.40 Ca	15.32 ±0.76 Ac	14.47 ±0.32 Ac	5.34 ±0.07 Bd **	1.70 ±0.06 Cd
12.80	14.78 ±0.77 Cb **	10.68 ±0.41 Db	21.27 ±0.86 Ba **	14.06 ±0.31 Da	10.31 ±0.14 Bc **	7.07 ±0.26 Bc	2.75 ±0.12 Cd **	1.41 ±0.07 Cd

表 5　镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫平均飞行时间的影响

Table 5　Effects of cadmium on the average flight duration of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	平均飞行时间 Average flight duration (h)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	6.64 ±0.34 ABb	6.88 ±0.30 Ab	10.22 ±0.54 Ba*	8.38 ±0.54 Ba	5.19 ±0.23 Ac	5.17 ±0.19 Bc	2.98 ±0.24 Ad**	1.77 ±0.04 Cd
0.20	6.95 ±0.30 Ab	6.87 ±0.33 Ab	11.92 ±0.56 Aa**	10.04 ±0.36 Aa	5.49 ±0.27 Ac	5.92 ±0.26 Ac	3.05 ±0.25 Ad	2.56 ±0.07 Ad
0.80	6.86 ±0.34 ABb*	5.97 ±0.17 Bb	9.48 ±1.12 Ba*	7.53 ±0.26 BCa	5.18 ±0.15 Ac	5.33 ±0.21 Bc	2.62 ±0.13 ABd**	2.06 ±0.13 Bd
3.20	5.95 ±0.31 Bb*	5.19 ±0.13 Cb	7.53 ±0.35 Ca*	6.62 ±0.30 Ca	5.32 ±0.34 Ab	5.25 ±0.20 Bb	2.45 ±0.03 Bc**	1.51 ±0.04 Dc
12.80	5.10 ±0.34 Cb**	3.55 ±0.11 Db	7.27 ±0.22 Ca**	5.15 ±0.19 Da	3.67 ±0.13 Bc**	3.09 ±0.09 Cc	1.49 ±0.05 Cd**	1.24 ±0.11 Ed

表 6　镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫平均飞行速度的影响

Table 6　Effects of cadmium on the average flight velocity of *Spodoptera exigua* adults at different ages

镉浓度 Concentration of cadmium (mg/kg)	平均飞行速度 Average flight velocity (km/h)							
	1 日龄 1 day-old		3 日龄 3 day-old		5 日龄 5 day-old		7 日龄 7 day-old	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
0 (CK)	3.39 ±0.15 Aa	3.35 ±0.10 Aa	3.17 ±0.16 ABab	3.55 ±0.08 Aa*	2.94 ±0.10 Ab	2.94 ±0.08 Ab	2.14 ±0.09 ABc**	1.51 ±0.04 Bc
0.20	3.50 ±0.23 Aa	3.21 ±0.12 ABa	3.05 ±0.18 ABa	3.38 ±0.10 ABa	3.06 ±0.18 Aa	2.69 ±0.07 Ab	2.20 ±0.13 Ab	2.08 ±0.10 Ac
0.80	3.32 ±0.15 Aa	3.33 ±0.09 ABa	3.45 ±0.14 Aa	3.53 ±0.07 Aa	2.94 ±0.08 Ab	2.83 ±0.08 Ab	2.20 ±0.10 Ac**	1.51 ±0.16 Bc
3.20	3.11 ±0.11 Ab	3.04 ±0.11 Bab	3.37 ±0.09 ABa	3.19 ±0.12 Ba	2.99 ±0.10 Ab	2.85 ±0.10 Ab	2.20 ±0.04 Ac**	1.17 ±0.06 Cc
12.80	3.04 ±0.15 Aa	3.03 ±0.09 Ba	2.95 ±0.11 Ba	2.79 ±0.08 Ca	2.86 ±0.09 Aa**	2.36 ±0.12 Ab	1.89 ±0.09 Bb**	1.28 ±0.08 BCc

下降($P<0.05$)；在 5 个浓度镉处理中，除了 1 日龄雌虫、5 日龄雌雄成虫之间平均飞行速度随着镉浓度的增加无显著差异外，其他日龄成虫平均飞行速度均有显著差异，且随着镉浓度的升高，平均飞行速度显著下降；同一镉浓度处理下同一日龄雌雄成虫之间平均飞行速度也有差异，其中，对照 3 日龄雌雄成虫之间平均飞行速度达到显著水平($P<0.05$)；12.80 mg/kg 镉处理下的 5 日龄成虫以及除 0.20 mg/kg 外的其他镉浓度处理下的 7 日龄雌雄成虫平均飞行速度均达到极显著差异($P<0.01$)。

3 讨论

昆虫迁飞行为是昆虫为了适应多变的环境而在长期进化的过程中形成的生存对策。昆虫通过迁飞能够延长种群取食的时间、扩大种群的分布空间，从而维持种群的繁衍和增长(江幸福等，2016)。农业上的很多重要害虫，如棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、粘虫 *Mythimna separata*、东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 和甜菜夜蛾等都具有远距离的迁飞习性(江幸福等，2016)。这些害虫在不同地区之间南北往返迁飞，给虫情测报增加了难度，也对农业生产和粮食安全造成了严峻的威胁。重金属可以显著影响昆虫的生长发育与繁殖(Su *et al*., 2014)，但目前关于重金属对迁飞昆虫飞行能力的影响的研究非常少见，因此本研究测定了取食含不同浓度镉人工饲料的不同日龄和不同性别甜菜夜蛾成虫的飞行能力。结果表明，重金属镉能够显著影响甜菜夜蛾成虫的飞行能力，且这种影响存在剂量-反应关系：低浓度(0.20 mg/kg)镉处理下甜菜夜蛾雌成虫具有最远飞行距离，但随着镉浓度的进一步升高，飞行能力显著下降；甜菜夜蛾成虫的日龄也显著影响其飞行能力：在所测日龄中，3 日龄成虫飞行能力最强，随后随着日龄的增加飞行能力显著下降；雌雄成虫之间的飞行能力存在差异，雌成虫的飞行能力在高日龄时显著强于雄蛾；而且随着重金属浓度的升高，雄成虫飞行能力下降比雌成虫更加明显。

对于迁飞性昆虫而言，幼虫食物质量的降低与数量的减少通常反映了周围栖息地环境条件的恶化，一定程度上有助于诱导成虫迁飞型的分化，从而促使昆虫种群离开不良的环境条件，扩散或者迁飞到更有利于种群存活的区域(韩兰芝，2004)。江幸福等(2011)和 Jiang 等(2013)研究发现，低浓度 Bt 杀虫蛋白也可增加甜菜夜蛾成虫强飞行个体的比例，但随着浓度的升高，对成虫飞行能力的抑制作用显著提高。研究发现甜菜夜蛾取食较不适宜生长的玉米苗后飞行能力也显著下降(江幸福等，1999)。因此造成成虫飞行能力下降的原因可能是高浓度的重金属镉影响了食物的品质，导致幼虫发生拒食行为，进而对食物的摄取量减少(Krams *et al*., 2014)、食物转化率和生长率降低(黄伯有等，2010；Baghban *et al*., 2014)、蛹重下降(Witeska *et al*., 2010；曹红妹等，2015；李二兰等，2016)，能源物质积累减少(Ge *et al*., 2011)，造成成虫的飞行肌不发达，从而影响其飞行能力；其次，一定浓度的重金属镉可能影响了雌虫卵巢的发育级别(Kumar *et al*., 2008)，使其生殖行为受到了影响，从而影响飞行能力；另一方面也可能是重金属镉的作用使得甜菜夜蛾的免疫力下降(Sorvari，2007；李艳敏等，2010；Pölkki *et al*., 2012；Talarico *et al*., 2014)，成虫的活力发生改变，从而飞行行为发生改变。

本研究结果还显示，镉胁迫对不同日龄甜菜夜蛾成虫的飞行能力也具有显著影响。甜菜夜蛾 1 日龄成虫具备一定的飞行能力，在 3 日龄后飞行能力开始缓慢下降。另外，雌、雄成虫的飞行能力存在差异。随着吊飞时间的延长，雌雄成虫飞行能力差异越来越明显(江幸福等，1998)。本研究中发现，对照组高日龄雌成虫飞行距离(6.12 km)极显著高于同一日龄雄成虫(2.63 km)(表 4)。镉对甜菜夜蛾雌蛾与雄蛾飞行能力的影响是不同的(表 4)，表现出明显的不同步性。随着重金属胁迫浓度的升高，对雄成虫飞行能力的抑制作用具有加强的趋势，尤其是在高浓度重金属镉(3.20 和 12.80 mg/kg)胁迫下，1 日龄开始雄成虫的飞行能力极显著弱于同一日龄的雌成虫。雌雄虫不仅存在着形态方面的性二型，而且对外界环境因子的耐受性也存在着差异。例如，意大利蝗 *Calliptanus italicus* 雌雄虫耐受高温的能力不同，研究显示在 36 ~ 48℃ 下，雄虫的死亡率显著高于雌虫(李爽等，2016)。赵克非(2011)研究发现雌雄褐飞虱对农药的耐受性是不同的。重金属显著抑制了雄虫的飞行能力，我们要进一步考虑甜菜夜蛾迁飞后雌雄比例的不平衡如何影响迁入地甜菜夜蛾个体的繁殖和种群的增长。因此，本研究结果应该为今后重金属对迁飞昆虫雌雄迁飞影响的生态风险评价提供参考。

本研究以国家食品安全标准中规定的蔬菜中镉含量标准(0.20 mg/kg)作为甜菜夜蛾人工饲料中

镉的最低浓度，而许多受镉污染的地区蔬菜可食用部分镉含量均不同程度存在超标现象（张珍等，2010），所以本实验设定的镉浓度在一定程度上可以揭示镉污染对甜菜夜蛾飞行能力的影响。然而关于重金属对鳞翅目昆虫飞行能力影响方面的研究鲜有报道，尽管本实验对镉胁迫下不同日龄和性别甜菜夜蛾成虫的飞行能力进行了研究，得到一些初步的结果，但就甜菜夜蛾而言，除了幼虫期食物，其他因素，如温度、湿度（江幸福等，2002）、成虫期营养（江幸福等，2000）、蛾龄（Jiang *et al*., 2010）等均会影响甜菜夜蛾成虫的飞行能力，而田间条件相对复杂，这些因素对其飞行能力都会产生影响，各因素之间的相互作用，使得飞行行为变成非常复杂的过程。另一方面，寄主植物不同组织部位对镉的蓄积能力以及代谢途径尚不清楚，通过在人工饲料中添加镉的方式只能作为评价其对飞行能力影响的一个参考，因此镉对甜菜夜蛾成虫飞行能力的影响机制还有待进一步研究。

参考文献（References）

Abdolgader RE, Hussain RA, Hasan SM, Agoub AA, 2013. Quantitative determination of Cd and Pb in tissues and organs of chickens raised in El-Jabel Alakhder region—Libya. *Food Nutr. Sci.*, 4(8): 763 – 766.

Alturiqi AS, Albedair LA, 2012. Evaluation of some heavy metals in certain fish, meat and meat products in Saudi Arabian markets. *Egypt. J. Aquatic Res.*, 38(1): 45 – 49.

Baghban A, Sendi JJ, Zibaee A, Khosravi R, 2014. Effect of heavy metals (Cd, Cu, and Zn) on feeding indices and energy reserves of the cotton boll worm *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Plant Prot. Res.*, 54(4): 365 – 373.

Cao HM, Zheng LX, Wei HY, 2015. Effects of heavy metal Ni^{2+} on the development and reproductive behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomol. Sin.*, 58(6): 650 – 657. [曹红妹，郑丽霞，魏洪义，2015. 重金属 Ni^{2+} 对亚洲玉米螟生长发育和生殖行为的影响. 昆虫学报，58(6)：650 – 657]

Devkota B, Schmidt GH, 2000. Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agricult. Ecosys. Environ.*, 78(1): 85 – 91.

Ge LQ, Zhao KF, Huang LJ, Wu JC, 2011. The effects of triazophos on the trehalose content, trehalase activity and their gene expression in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae). *Pest. Biochem. Physiol.*, 100(2): 172 – 181.

Han LZ, 2004. The Ecological Mechanism of Beet Armyworm Migration. PhD Dissertation, Nanjing Agricultural University, Nanjing. [韩兰芝，2004. 甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner)迁飞的生态机制研究. 南京：南京农业大学博士学位论文]

Huang BY, Wang FH, Cai Y, Li GH, Zhang XD, Zhou HH, Pang Y, 2010. Effects of four insect diets on the development, food digestion and utilization of *Myrmeleon sagax* larvae. *Chin. J. Appl. Entomol.*, 47(1): 92 – 95. [黄伯有，王方海，蔡毅，李广宏，张宣达，周汉辉，庞义，2010. 四种昆虫饵料对穴蚁蛉幼虫生长发育及消化利用的影响. 应用昆虫学报，47(1)：92 – 95]

Hu MM, 2013. Accumulation and Excretion Activities of Lead and Cadmium in *Spodoptera exigua* (Hübner) and the Impact on the Population Increase. MSc Thesis, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu. [胡蒙蒙，2013. Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 在甜菜夜蛾体内的积累与排泄及对种群增长的影响. 江苏扬州：扬州大学硕士学位论文]

Hu MM, Cai WC, Su HH, Yang YZ, 2014. Accumulation of lead in *Spodoptera exigua* (Hübner) and its impact on the population. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 25(4): 1145 – 1150. [胡蒙蒙，蔡文宸，苏宏华，杨益众，2014. Pb^{2+} 在甜菜夜蛾体内的积累及对种群的影响. 应用生态学报，25(4)：1145 – 1150]

Jiang XF, Chen J, Luo LZ, Zhang L, 2011. Influences of the insecticidal toxin Cry1Ac on adult flight performance of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Plant Prot.*, 37(6): 102 – 106. [江幸福，陈建，罗礼智，张蕾，2011. Cry1Ac 杀虫蛋白对甜菜夜蛾飞行能力的影响. 植物保护，37(6)：102 – 106]

Jiang XF, Chen J, Zhang L, Sappington TW, Lou LZ, 2013. Increased long-flight activity triggered in beet armyworm by larval feeding on diet containing *Cry1Ac* protoxin. *PLoS ONE*, 8(5): e63554.

Jiang XF, Luo LZ, Hu Y, 1998. The relationship of the beet armyworm flight capability and moth age. In: Proceedings of National Symposium on Young Plant Protection Science and Technology Workers, Beijing. [江幸福，罗礼智，胡毅，1998. 甜菜夜蛾飞行能力及其与蛾龄的关系. 见：植物保护21世纪展望暨全国青年植物保护科技工作者学术研讨会论文集，北京]

Jiang XF, Luo LZ, Hu Y, 1999. Influence of larval diets on development, fecundity and flight capacity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Acta Entomol. Sin.*, 42(3): 270 – 276. [江幸福，罗礼智，胡毅，1999. 幼虫食物对甜菜夜蛾生长发育、繁殖及飞行的影响. 昆虫学报，42(3)：270 – 276]

Jiang XF, Luo LZ, Hu Y, 2000. Effects of adult nutrition on the reproductive and flight of the beet armyworm. *J. Plant Prot.*, 27(4): 327 – 332. [江幸福，罗礼智，胡毅，2000. 成虫期营养对甜菜夜蛾生殖和飞行的影响. 植物保护学报，27(4)：327 – 332]

Jiang XF, Luo LZ, Li KB, Cao YZ, Hu Y, Liu YQ, 2002. Influence of temperature on flight capacity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Acta Entomol. Sin.*, 45(2): 275 – 278. [江幸福，罗礼智，李克斌，曹雅忠，胡毅，刘悦秋，2002. 温度对甜菜夜蛾飞行能力的影响. 昆虫学报，45(2)：275 – 278]

Jiang XF, Luo LZ, Sappington TW, 2010. Relationship of flight and reproduction in beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae), a migrant lacking the oogenesis-flight syndrome. *J. Insect Physiol.*, 56(11): 1631 – 1637.

Jiang XF, Zhang L, Cheng YX, Luo LZ, 2016. Research advances and perspectives on migration-induced mechanisms promoting outbreaks of major lepidopteran insect pests in China. *Sci. Sin. Vit.*, 46(5):

565 – 572. ［江幸福，张蕾，程云霞，罗礼智，2016. 中国主要鳞翅目农业害虫迁飞致灾机制研究与展望. 中国科学：生命科学，46(5)：565 – 572］

Kafel A, Rozpędek K, Szulińska E, Zawisza-Raszka A, Migula P, 2014. The effects of cadmium or zinc multigenerational exposure on metal tolerance of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21(6): 4705 – 4715.

Kafel A, Zawisza-Raszka A, Szulińska E, 2012. Effects of multigenerational cadmium exposure of insects (*Spodoptera exigua* larvae) on anti-oxidant response in haemolymph and developmental parameters. *Environ. Pollut.*, 162(162): 8 – 14.

Krams I, Kecko S, Kangassalo K, Moore FR, Jankevics E, Inashkina I, 2014. Effects of food quality on trade-offs among growth, immunity and survival in the greater wax moth *Galleria mellonella*: food quality and life history trade-offs. *Insect Sci.*, 22(3): 431 – 439.

Kumar TR, Emerald DM, Selvisabhanayakam, 2008. Impact of heavy metal mercury on the ovary of adult female *Odontopus varicornis* (Dist.) (Hemiptera: Pyrrhocoridae). *Asian J. Biol. Sci.*, 2(3): 304 – 307.

Mikkola K, Salmensuu P, 1965. Migration of *Laphygma exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) in Northwestern Europe in 1964. *J. Ann. Zool. Fenn.*, 2(2): 124 – 139.

Li EL, Sun YL, Guo HW, Gao HJ, Ren CJ, Wang FJ, Wang YW, Mou ZM, 2016. Effect of neonicotinoid insecticide imidacloprid on growth, development and food utilization of *Bombyx mori* larvae. *Sci. Sericult.*, 42(3): 473 – 482. ［李二兰，孙永亮，郭红伟，高绘菊，任春久，王凤娟，王彦文，牟志美，2016. 新烟碱类杀虫剂吡虫啉对家蚕幼虫生长发育及食物利用的影响. 蚕业科学，42(3)：473 – 482］

Li S, Cai MT, Ma WY, Ji R, 2016. Difference in heat tolerance and enzyme activity between *Calliptamus italicus* (Orthopera: Acrididae) and *Gomphocerus sibiricus* (Orthopera: Acrididae). *Chin. J. Appl. Entomol.*, 53(5): 1077 – 1083. ［李爽，蔡梦婷，马婉颖，季荣，2016. 意大利蝗和西伯利亚蝗高温耐受能力及酶活性比较研究. 应用昆虫学报，53(5)：1077 – 1083］

Li YM, Fang Q, Hu C, Ye GY, 2010. Effects of cadmium on hemocyte number, encapsulation and morphology in *Boettcherisca peregrina* (Diptera: Sarcophagidae). *Acta Entomol. Sin.*, 53(9): 969 – 977. ［李艳敏，方琦，胡萃，叶恭银，2010. 重金属 Cd^{2+} 对棕尾别麻蝇血细胞数量、包囊作用和形态结构的影响. 昆虫学报，53(9)：969 – 977］

Pölkki M, Kangassalo K, Rantala MJ. 2012. Transgenerational effects of heavy metal pollution on immune defense of the blow fly, *Protophormia terraenovae*. *PLoS ONE*, 7(6): e38832.

Song W, Chen BM, Liu L, 2013. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China. *Res. Soil Water Conserv.*, 20(2): 293 – 298. ［宋伟，陈百明，刘琳，2013. 中国耕地土壤重金属污染概况. 水土保持研究，20(2)：293 – 298］

Sorvari J, Rantala LM, Rantala MJ, Hakkarainen H, Eeva T, 2007. Heavy metal pollution disturbs immune response in wild ant populations. *Environ. Pollut.*, 145(1): 324 – 328.

Su HH, Hu MM, Harvey-Samuel T, Yang YZ, 2014. Accumulation and excretion of cadmium in three successive generations of *Spodoptera exigua* (Hübner) and impact on the population increase. *J. Econ. Entomol.*, 107(1): 223 – 229.

Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomol. Sin.*, 50(2): 178 – 185. ［孙虹霞，刘颖，张古忍，2007. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. 昆虫学报，50(2)：178 – 185］

Sun HX, Xia Q, Zhou Q, Zhang GR, 2008. Accumulation and excretion of nickel in *Spodoptera litura* (Fabricius) larvae fed on diets with Ni^{2+}. *Acta Entomol. Sin.*, 51(6): 569 – 574. ［孙虹霞，夏嫱，周强，张古忍，2008. 斜纹夜蛾幼虫对食物中重金属 Ni^{2+} 的积累与排泄. 昆虫学报，51(6)：569 – 574］

Sun HX, Xia Q, Tang WC, Zhang GR, Dang Z, 2010. Regulation of energy reserves in the hemolymph of *Spodoptera litura* (Fabricius) larvae under nickel stress. *Acta Entomol. Sin.*, 53(4): 361 – 368. ［孙虹霞，夏嫱，唐文成，张古忍，党志，2010. Ni^{2+} 胁迫对斜纹夜蛾幼虫血淋巴中能量物质水平的适应性调节. 昆虫学报，53(4)：361 – 368］

Talarico F, Brandmayr P, Giulianini PG, Ietto F, Naccarato A, Perrotta E, Tagarelli A, Giglio A, 2014. Effects of metal pollution on survival and physiological responses in *Carabus* (*Chaetocarabus*) *lefebvrei* (Coleoptera, Carabidae). *Eur. J. Soil Biol.*, 61(5): 80 – 89.

Wen LZ, Zhang YJ, 2010. Modelling of the relationship between the frequency of large-scale outbreak of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and the wide-area temperature and rainfall trends in China. *Acta Entomol. Sin.*, 53(12): 1367 – 1381. ［文礼章，张友军，2010. 我国甜菜夜蛾大尺度暴发频度与广域温度和广域降雨量关系的预测模型. 昆虫学报，53(12)：1367 – 1381］

Witeska M, Bilska K, Sarnowski P, 2010. Effects of copper and cadmium on growth and yolk utilization in barbel (*Barbus barbus* L.) larvae. *Polish J. Environ. Stud.*, 19(1): 227 – 230.

Wu JJ, Gao HH, Bai XH, Zhao HY, 2012. Effect of Cd^{2+} stress on feeding behavior of the aphid *Sitobion avenae* (Fabricius). *Acta Agric. Boreali-occident. Sin.*, 21(12): 198 – 201. ［武晶晶，高欢欢，白小惠，赵惠燕，2012. 镉胁迫对麦长管蚜取食行为的影响. 西北农业学报，21(12)：198 – 201］

Zhang B, Liu H, Wang JJ, Zhou X, 2008. Advance in the research on *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 24(10): 427 – 433. ［张彬，刘怀，王进军，周旭，2008. 甜菜夜蛾研究进展. 中国农学通报，24(10)：427 – 433］

Zhang HH, 2015. Pollution Effects of Heavy Metals in Dry Deposition on Soil-Vegetable System in Suburban Shanghai. PhD Dissertation, East China Normal University, Shanghai. ［张焕焕，2015. 上海市郊大气重金属干沉降对土壤-叶菜系统的污染效应. 上海：华东师范大学博士学位论文］

Zhang XY, Zhong T, Liu L, Ouyang X, 2015. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China. *PLoS ONE*, 10(8): e0135182.

Zhang Z, Lu KX, Meng QF, 2010. Research progress and control

countermeasures of heavy metal in vegetables. *J. Ningbo Univ.* (*Nat. Sci. Engineer. Ed.*), 23(3): 22-26. [张珍, 陆开形, 孟秋峰, 2010. 蔬菜重金属污染研究进展与防治措施. 宁波大学学报(理工版), 23(3): 22-26]

Zhao KF, 2011. Effects of Several Pesticides on Flight Capacity, Energy Substances and Reproduction of the Brown Planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae). MSc Thesis, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu. [赵克非, 2011. 几种农药对褐飞虱飞行能力、能量物质及生殖的影响. 江苏扬州: 扬州大学硕士学位论文]

(责任编辑: 赵利辉)